

ロケットポンプ用インデューサに発生する キャビテーションの観察*

(その1 ケーシング形状による影響)

渡 邊 光 男*¹ 橋 本 知 之*¹ 渡 辺 義 明*¹
長谷川 敏*¹ 山 田 仁*¹

Observation of the Cavitation in Rocket Turbopump Inducer. 1st Report Effect of Casing Geometry.

Mitsuo WATANABE, Tomoyuki HASHIMOTO, Yoshiaki WATANABE,
Satoshi HASEGAWA and Hitoshi YAMADA

ABSTRACT

Some observations of rotating cavitation in a rocket turbopump inducer were made with three types of casing: a modified, an original and a straight casing. Rotating cavitation was observed with the original casing at the design flow rate, but was not observed with the modified or the straight one. The region of occurrence of rotating cavitation with the modified or the straight casing seemed to be shifted to a higher flow rate range, which might be caused by the backflow at the inducer inlet. It is also reported that the low cycle oscillation that occurred after attached cavitation is related to rotating cavitation and attached cavitation.

Key Words: Rocket, H-, Turbopump, Inducer, Rotating Cavitation

概 要

LE-7用液酸ターボポンプの開発過程において問題となった、インデューサに発生する旋回キャビテーションは、ケーシング形状を変更することで解決できた。しかし、その発生過程を可視化等において明らかにすることは実機ターボポンプでは困難であった。そこで、ターボポンプ試験において旋回キャビテーションの抑制を試みた代表的な3種類のケーシングを、航技研のキャビテーションタンネルを使用して可視観察を行い、ケーシング形状がキャビテーションに与える影響について調べた。実機ターボポンプにおいて問題となった従来型ケーシングではやはり広い流量範囲で旋回キャビテーションが生じ振動レベルも大きく、さらに低周波の振動も発生することが判明した。ストレート型ならびに改良型ケーシングは抑制効果が見られ、さらに改良型ケーシングは振動の軽減や低周波振動にも効果があることが確認された。

これらの観察の結果、実機ターボポンプにおいて採用された改良型ケーシングの有効性が明らかになった。

1. はじめに

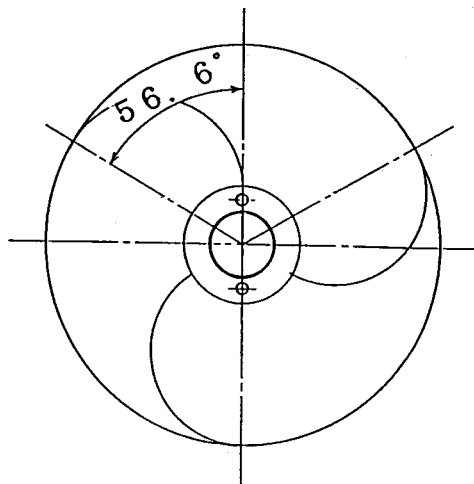
我が国が自主開発したH-ロケットは、現在技術試験衛星等の打ち上げに運用され好結果が得られている。同ロケットの第一段エンジンLE-7用液酸ターボポンプの開発過程では、初めて旋回キャビテーションが要因と考えられる回転非同期軸振動が問題とされた^{(1)~(3)}。そ

* 平成9年3月27日受付 (received 27 March 1997)

*¹ 角田宇宙推進技術研究センターロケット推進研究部
(Kakuda Research Center, Rocket Propulsion
Research Division)

の後、米国のスペースシャトル主エンジンの液酸ターボポンプ⁽⁴⁾、欧州で開発中のバルカンエンジンの液水ターボポンプ⁽⁵⁾あるいはLE-7エンジンの液水ターボポンプ⁽⁶⁾でも同様な現象が確認されており、旋回キャピテーションはロケット用ターボポンプのインデューサに共通する問題である事が改めて明らかになっている。LE-7用液酸ターボポンプでは、ケーシング形状を変更することで旋回キャピテーションを押さえ、振動レベルを低くする事に成功した⁽¹⁾。今後予定されているLE-7改や再使用ロケットの研究を進める上で、インデューサに発生する旋回キャピテーションを解明することは、ターボポンプの信頼性を向上させるためにも重要なことである。しかし、実機のターボポンプではインデューサに発生するキャピテーションを可視化等で詳しく調べることは、作動流体が極低温(液体酸素で - 183)であることから困難であった。

そこで本報告は、キャピテーションタンネル試験設備⁽⁷⁾を用い、実機ターボポンプにおいて試験を行った旋回キャピテーションの抑制効果が確認されたケーシングを含む、個々に形状の異なる3種類の透明ケーシングについて旋回キャピテーションの変化を観察したものである⁽⁸⁾。はじめに、既に報告されている旋回キャピテーション、定常非対称キャピテーションを含む、今回の試験でみられた不安定振動についてケーシング形状を変化させた場合の発生領域の変化について比較検討を行う。次にこれらの回転非同期振動について、個々にその特徴を可視観察結果をまじえて報告する。



2. 試験装置と試験方法

2.1 供試インデューサ

本試験に用いたインデューサは、LE-7液酸ターボポンプインデューサの開発基礎試験用として製作されたものである。試験設備の制約上インデューサの径を5インチにスケールダウンしている。従って、外径、ハブ径は異なるがその他の諸元はLE-7液酸ターボポンプインデューサとほぼ同一の仕様となっている。インデューサは耐熱鋼(A-286)製で機械加工されたものである。インデューサの概略形状を図1に、主要設計諸元を表1に示した。

表1 インデューサの主要設計諸元

入口流量係数		0.0775
出口流量係数		0.094
入口チップ径	:(mm)	127.4
入口ボス比		0.3
出口チップ径	:(mm)	127.4
出口ボス比		0.5
入口チップ角度(翼先端):	(度)	7.25
出口チップ角度(翼先端):	(度)	9.25
チップソリディティ		2.7
後退翼巻角度	:(度)	56.6

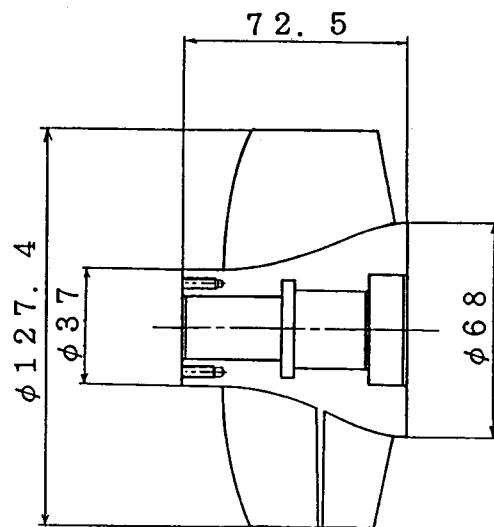


図1 3枚羽根インデューサ

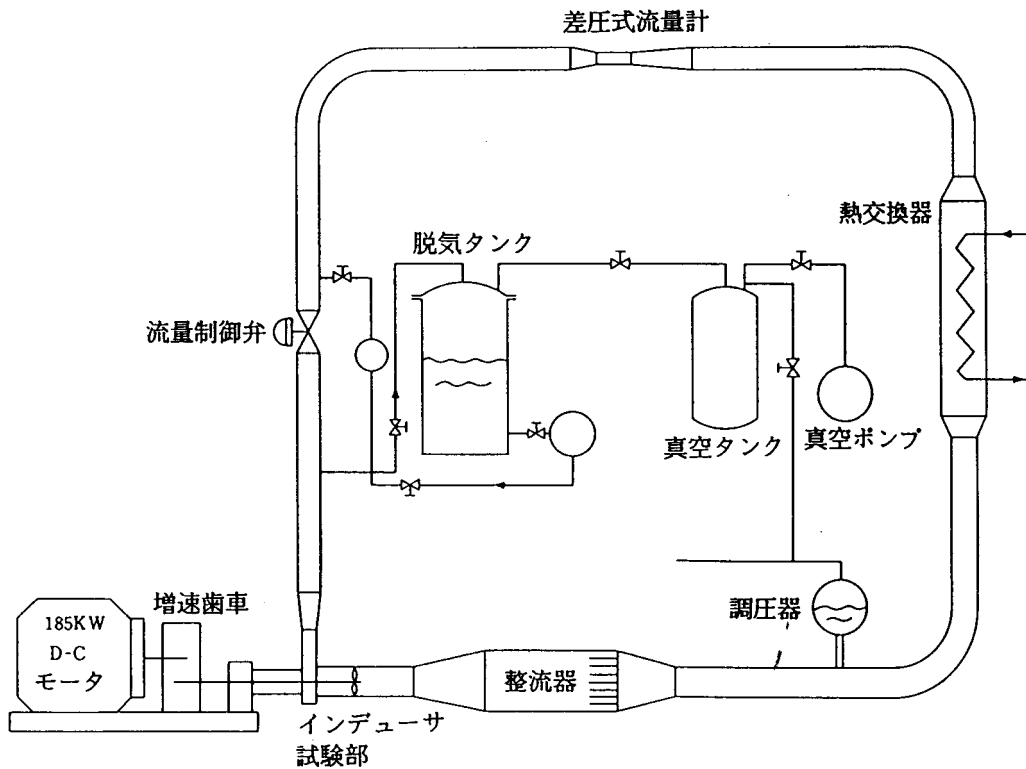


図2 キャピテーションタンネル

2.2 試験装置

試験は、図2に概要を示す航技研・角田宇宙推進技術研究センターに設置されているキャピテーションタンネル試験設備を用いて行った。この設備は作動流体に水を用いる、閉ループの回流水槽である。水は、中央に設置された脱気タンクにより充分に脱気された後、水槽内に供給される。供試インデューサは直流電気モータによって駆動され、供試部上流のシリンダピストンを併設した圧力調整装置により加圧、減圧を行うことで入口圧力が任意に設定できる。供試部の下流にはインデューサ流量を任意に設定できる流量制御弁があり、設定された流量はベンチュリー流量計により計測される。また設備には熱交換器があり、試験中の作動流体の温度はほぼ一定に保たれる。

2.3 供試ケーシング

図3に試験で用いた3種類の透視管の形状の比較を示す。従来型は、LE-7液酸ターボポンプにおいて巡回キャピテーションが問題となったときのケーシング形状を模擬したものであり、インデューサ入口直近径が広がったものである。改良型は、実機ターボポンプにおいて各部の寸法が、 $D_1 = D_2 + (D_2 - D_t)$ の条件を満たし、巡回キャピテーションが消滅した時の形状⁽¹⁾を模擬した

ケーシング	D_1	D_2	D_t
改良型	131	128.85	127.4
従来型	127.6	128.85	127.4
ストレート型	129.1	129.1	127.4

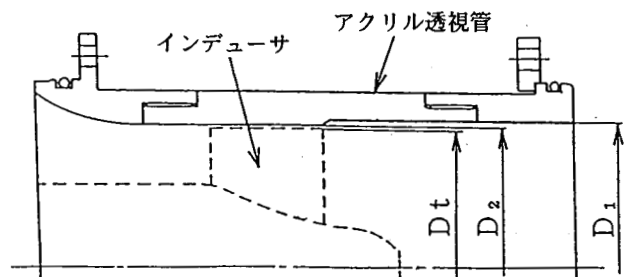


図3 インデューサケーシング形状

ものであり、従来型とは反対に入口直近で径が狭まった形状である。また、ストレート型は改良型と同様に巡回キャピテーション抑制の効果が認められた⁽⁶⁾形状で、入口直近がストレートでチップクリアランスを従来型、改

良型よりも大きくとった形状である。これらのケーシングは透明なアクリル樹脂製で、外部からの可視観察が可能となっている。

2.4 試験方法

試験は一部の試験を除き、主に7,000rpmにて行われた。試験では回転数、流量を一定に保ち、入口圧力を徐々に低下させることによってキャピテーション係数を低下させ、インデューサ入口圧力、出口圧力、流量、回転数、温度などのデータを取得した。これらの計測出力はA-D変換器によってデジタル量に変換され、解析装置のメモリに保存される。また、インデューサ入口より約200mm上流とインデューサ出口より15mm下流にフラッシュマウントされた振動圧センサにより、インデューサ入口、出口の圧力振動を測定した。また、軸受後方に設置された渦電流式変位計により、軸振動を測定した。これらのデータは、FMデータレコーダに記録され、試験後にFFTアナライザによって周波数解析された。試験中は電磁式ピックアップからのパルス出力により、ストロボを明滅させ、インデューサの回転を見かけ上停止させ、キャピテーションの発生状況を調べた。これらの結果を参考に、流量と入口圧力を設定し高速度カメラによる撮影を行った。高速度撮影には1 KW × 6個の連続光源を用い、100フィートの16mmフィルムで毎秒約7,000コマで撮影を行った。また、16mmフィルム用画像解析装置を用いて高速度撮影した写真から、キャピティの長さや面積を求めた。

3. 試験結果

3.1 キャピテーションによる不安定現象の発生領域

旋回キャピテーションによって代表されるキャピテーションによる不安定現象は軸系を不安定にする大きな要因となっている。旋回キャピテーションは3枚の羽根上のキャピティ長さがそれぞれ変化し、キャピティの領域がインデューサの回転速度より速い速度でインデューサの入口を旋回する。この現象は既に上條らにより解明されているが^{(9)~(11)}、このときに回転同期周波数の1.0~1.3倍程度の周波数の軸振動を誘発する現象である。この旋回キャピテーションは、流量が多くなるほど発生しやすくなる傾向を持ちあわせている⁽⁶⁾。図4に回転数 $N = 7,000\text{rpm}$ で流量比 Q/Q_d とキャピテーション係数 σ をパラメータにして、キャピテーションによる不安定現象の発生した領域を示す。は旋回キャピテーション、は定常非対称キャピテーション、は低周波振動の発生領域を示している。従来型では $Q/Q_d = 0.8 \sim 1.2$ の全ての流量条件において、 $\sigma = 0.05$ の不安定現象の発生が認められた。また、ターボポンプの運転条件範囲($Q/Q_d =$

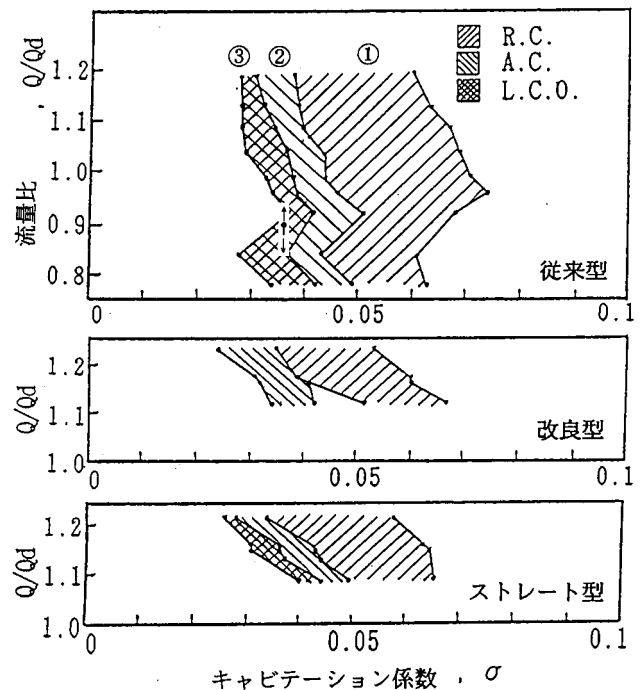


図4 キャピテーションの発生領域

0.98~1.04)と旋回キャピテーションの発生領域が重複することは実機の試験結果と良く一致することが確認された。一方、改良型とストレート型では旋回キャピテーションによる不安定領域は共に作動条件から大きく外れた $Q/Q_d = 1.1$ 以上の高流量域に移行する事を示している。従って、旋回キャピテーションの発生領域で比較すると、改良型とストレート型は実用領域での抑制効果が十分に期待できるものと考えられる。

図5-1に設計流量でキャピテーション係数 $\sigma = 0.09$ 附近での3種類のケーシングでのキャピテーションの発生状況を示す。図はビデオカメラにより撮影されたもので時間的に平均化されたものである。改良型およびストレート型ケーシングでは、チップキャピティはインデューサ上流側に僅かではあるが逆流現象が観察される。従来型では前者とは異なりこの現象はみられない。図5-2に流量係数 $\lambda = 0.084$ 、キャピテーション係数 $\sigma = 0.065$ 附近での3種類のケーシングでのキャピテーションの発生状況を示す。撮影条件は図5-1と同一である。改良型およびストレート型ケーシングでは、チップキャピティは上流側に広く観察されており、インデューサ入口部に大規模な逆流が存在するものと思われる。それに対し、従来型ではキャピティは羽根表面近傍に限定され、インデューサ入口部での逆流は前者に比べて少ない。このことから、図4に示した改良型およびストレート型ケーシングでは、旋回キャピテーションの発生領域が高

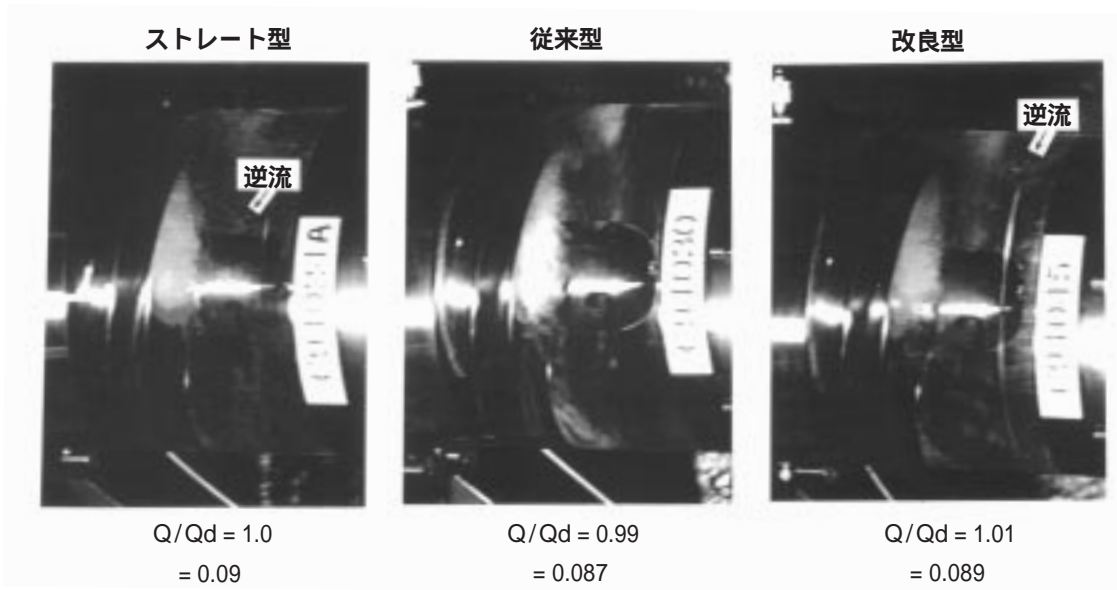


図5-1 キャビティの逆流の観察（設計流量）

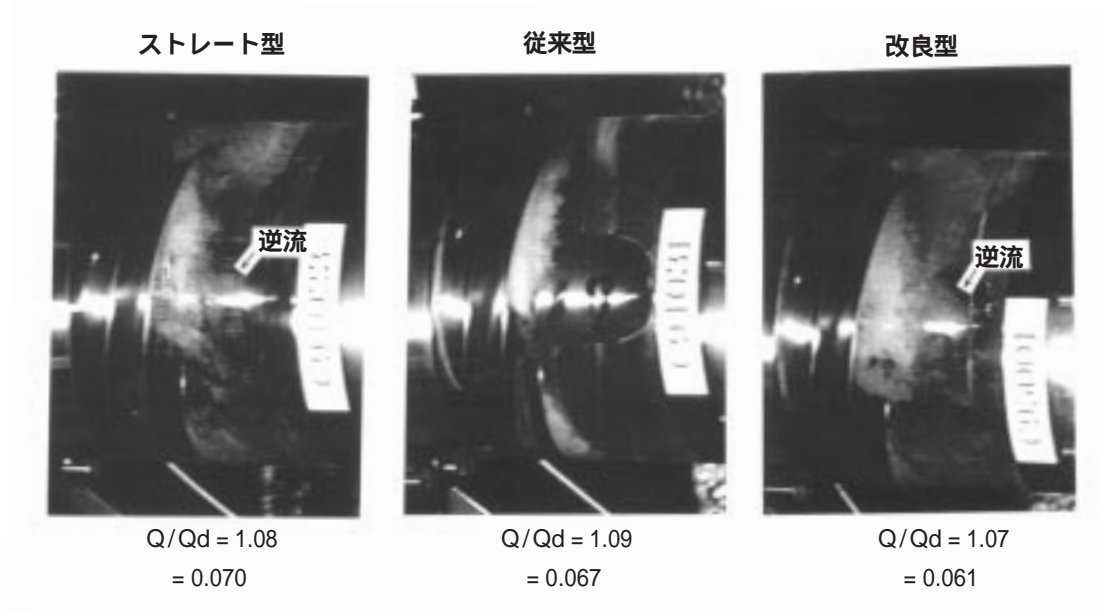


図5-2 キャビティの逆流の観察（流量大）

流量側に限定された理由として、インデューサ入口部の逆流が関与しているものと考えられる。旋回キャビテーションは、キャビティ長さが翼のピッチに等しくなった時点で発生することが知られている⁽⁵⁾⁽⁹⁾。このことから、翼内部の流路をキャビティがふさぐことが旋回キャビテーションの現象と深く関与していることが推測できる。したがって、入口部の逆流はキャビティを上流に流れ、流路に入り込むキャビティの量を減らすことにより旋回キャビテーションを抑制すると考えられる。また、

キャビテーション係数の低い領域でキャビテーションにより誘発されて発生するシステム振動の一つである低周波振動の発生状況を比べると、旋回キャビテーションによる振動の抑制効果が認められた改良型はこの種不安定現象の抑制にも効果がある事が確認された。

3.2 旋回キャビテーションによる回転非同期軸振動

図6に各ラインの設計流量付近における軸振動のFFT周波数分析結果を示す。従来型ラインでは、インデュー

サ入口圧力を徐々に低下させると、キャビテーション係数の低下とともに、回転非同期(の1.0~1.3倍程度)の巡回キャビテーションによる振動が発生する。さらにキャビテーション係数が低下して行くと、回転非同期の振動が徐々に回転同期に近付き、定常的に2枚の羽根で長く1枚の羽根で短い、キャビティの伸縮のともなわない定常非対称キャビテーション振動(同期振動)に移る様子が確認できる。改良型やストレート型では回転非同期の振動現象や、これによって誘発される回転同期の振動現象はみられない。図7に代表的な巡回キャビテーションの高速度写真を示す。また、図8には3枚のそれぞれの羽根に生じるチップキャビティの面積の変化を図7の写真画像解析した結果を示す。キャビティ面積の広い領域は羽根番号3 2 1 3の順で変化しており、キャビティの領域が羽根の回転方向に、羽根の回転速度より速く旋回していることが示されている。また、図から読み取った振動の周期は、 ω を巡回キャビテーションによる振動の周波数とすると($\omega -$)と一致する。

図9にキャビテーション係数に対する軸振動の大きさについて、各ラインの代表的な結果を示す。この軸振動は、同じ流量比で各ラインに巡回キャビテーションが発生した結果を示したもので、そのために実用範囲から大きく外れた高流量域での比較となっている。従来型ではキャビテーション係数が0.075~0.039の広い範囲で軸振動が大きくなっているのに対し、改良型は0.065

~0.035の低い領域に移り、振動レベルは十分に抑制されている。一方、ストレート型ではこの領域は改良型と同様低い領域に移行しているが、振動の大きさでは従来型とほぼ同程度の値を示している。従来型およびストレート型に対し、改良型では振動のレベルは約40%程度に軽減されている。以上の結果から、改良型ケーシングは、振動や騒音の原因となる巡回キャビテーションの発生領域を限定させ、現象を弱めることによって軸振動の大きさを軽減させる効果をもつものと考えられる。

3.3 インデューサに発生する低周波振動の観察

この低周波振動は吸込性能曲線の負の勾配を持つ近傍で生じ、系を不安定にさせる事が知られている。上條らは、高速度カメラによりキャビティ長さの変化を観察し、全ての羽根上のキャビティが同位相で振動していることを示し、この低周波振動はキャビテーションに誘発されたシステム振動であると結論している⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。図10はおよそ10Hzの低周波振動が起きているときの、インデューサ出口振動圧力をFFT周波数解析した結果を示す。インデューサ流量は、流量比90%で設計値よりかなり少ない状態にある。解析結果から、キャビテーション係数($\sigma=0.038 \sim 0.036$)の低い領域においてかなり大きな振幅を伴った振動であることが読み取れる。また、キャビテーション係数の低下と共に巡回キャビテーション(1.2)定常非対称キャビテーション(同期)低周波振動の順に発生過程をたどっており、このことから低周波

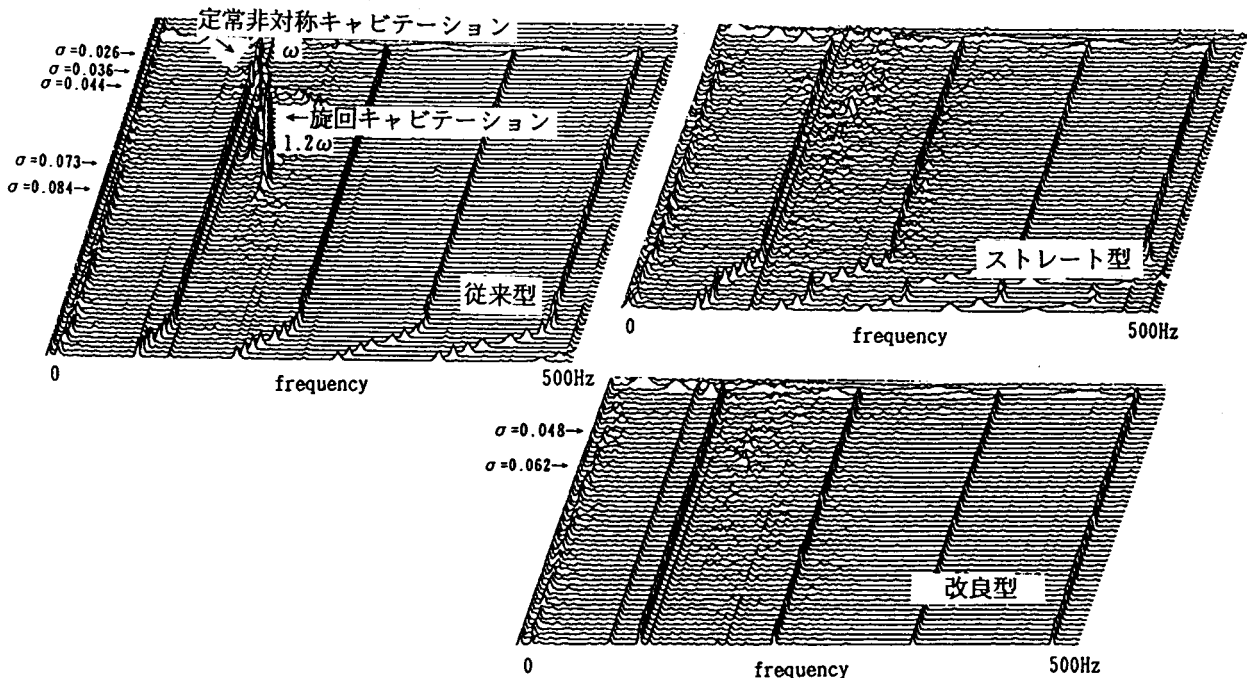


図6 軸振動の周波数解析

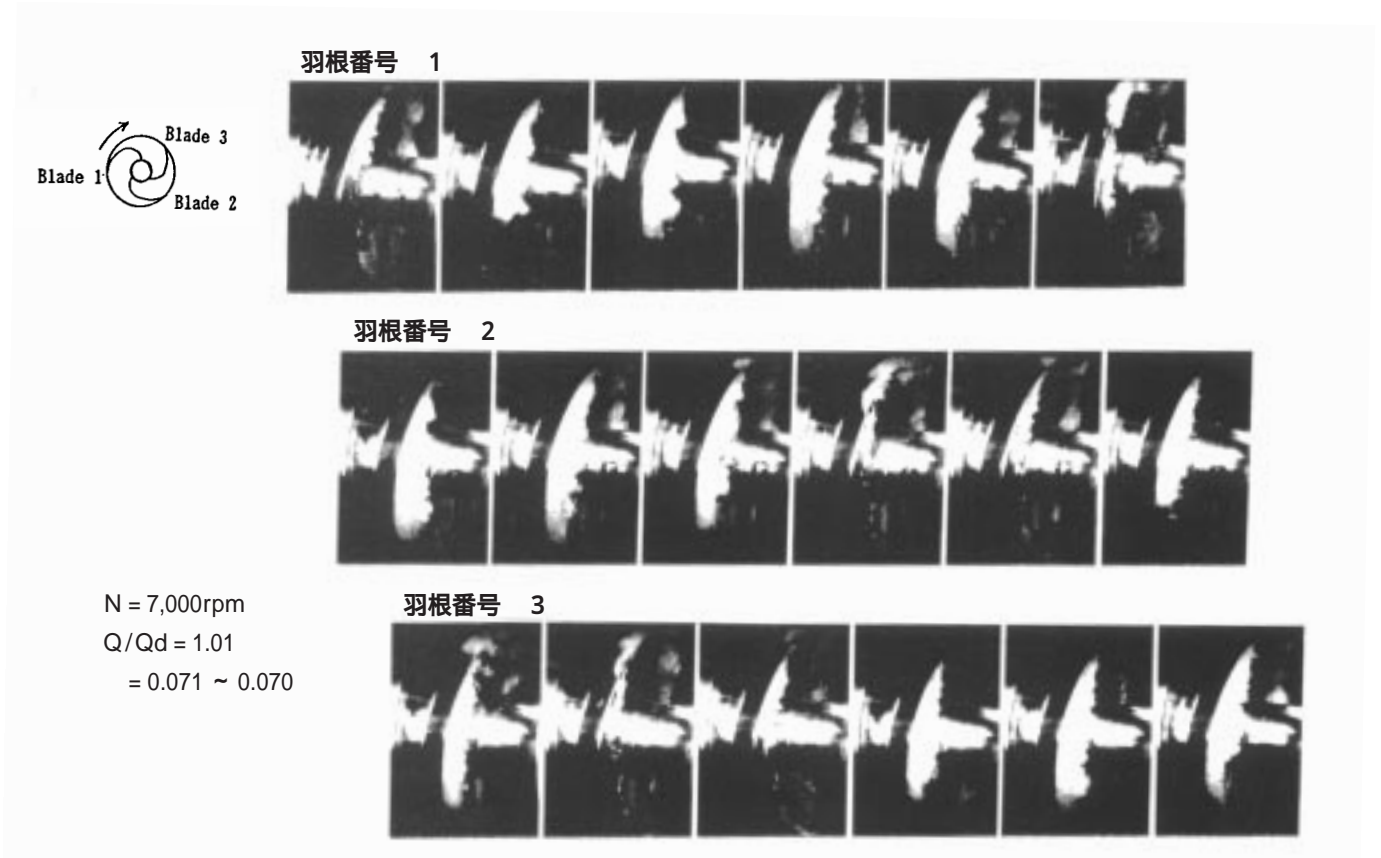


図7 3枚の羽根上の旋回キャピテーションの変化

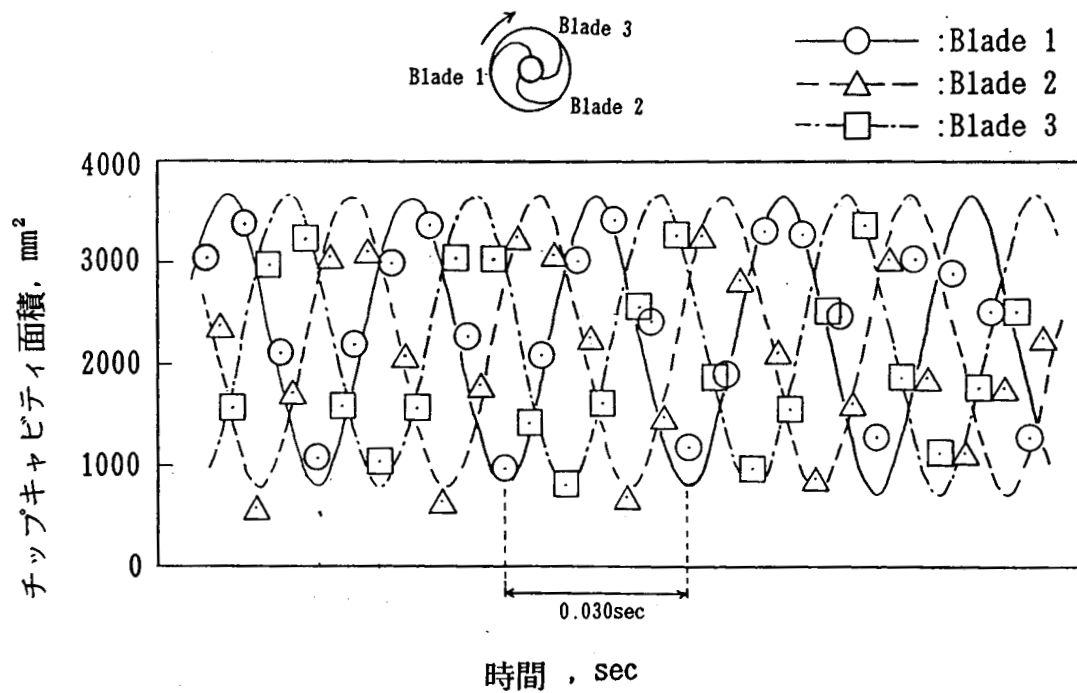


図8 キャピティ長さの変化(旋回キャピテーション)

振動は巡回キャピテーションの延長上にある現象と考えられる。

図 11 は低周波振動が発生したときの羽根上のキャピティ形状の変化を高速度撮影したもので、条件は図 10 と同一である。図はそれぞれ 1 枚の羽根上のキャピティの変化と、羽根番号 1 2 3 1 の順での連続的なキャピティの変化を示しているが、この可視観察結果だけでは低周波振動の現象説明は困難と考えられる。そこで図 11 の撮影フィルムを画像解析してキャピティの変化を求めたものを図 12 に示した。解析の結果、文献⁽⁹⁾の観察結果とは異なりキャピティ長さは同位相では変化していないことが判明した。しかし、キャピティの状態は図中に示す、2 枚の羽根上で長く 1 枚で短い状態（状態 A）と、3 枚の羽根上で長い状態（状態 B）が規則的に繰返されていることがわかる。また、状態 A は定常非対称キャピテーションに類似した状態であり、状態 B はキャピテーション係数が低い領域での定常対称キャピテーションに類似した状態である。このことは本試験でみられた低周波振動が 2 つの状態の間を振動する現象であることを示している。

図 13 に流量を変化させた場合の吸込性能曲線を示す。図中の は低周波振動が観察された点を示す。特に流量係数 $Q/Q_d = 0.0713 \sim 0.0806$ の範囲では低周波振動が観察された付近で吸込性能曲線が重なっている領域が存在する。

これは低周波振動が起こっている範囲で揚程曲線を描けば局所的に右上がりの勾配が存在し得ることを示している。一般的に、揚程曲線の右上がり勾配はサージの発生原因であるとされている。したがってこの場合もサージに起因する流量変動が起こっていると推定される。図 4 に、低周波振動の高速度写真観察を行った点からサージモードによる流量変動を想定した領域を矢印で示した。この領域は、定常非対称キャピテーション（状態 A）と定常対称キャピテーション（状態 B）との間の振動であると予想され、これは高速度撮影結果と一致する。

4 . むすび

ロケット用ターボポンプインデューサに発生するキャピテーションによる不安定現象を観察した。本試験の結果、次の事が確認された。

従来型ケーシングでは、設計流量を含む流量の広い範囲で巡回キャピテーションが生じた。改良型とストレート型ケーシングでは高流量域に発生領域が移行し、実用領域における抑制効果が確認された。

抑制効果が確認されたストレート型ケーシングでは、振動の大きさは従来型と同レベルであるのに対し改良型ケーシングでは約 40% 程度に軽減されることが確認された。

キャピティ形状の比較によりインデューサ入口部の逆

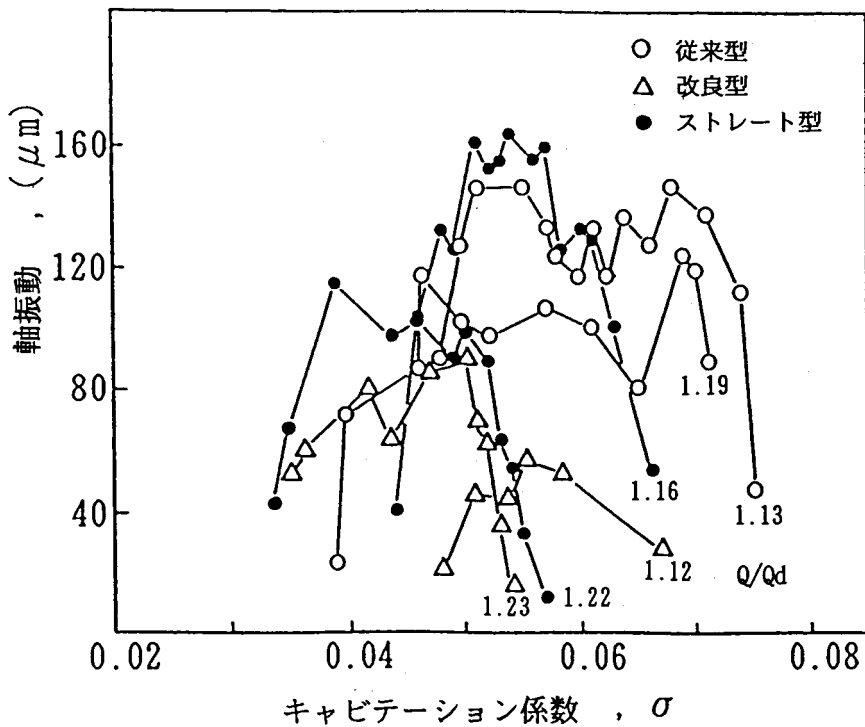


図 9 巡回キャピテーション発生時の軸振動の比較

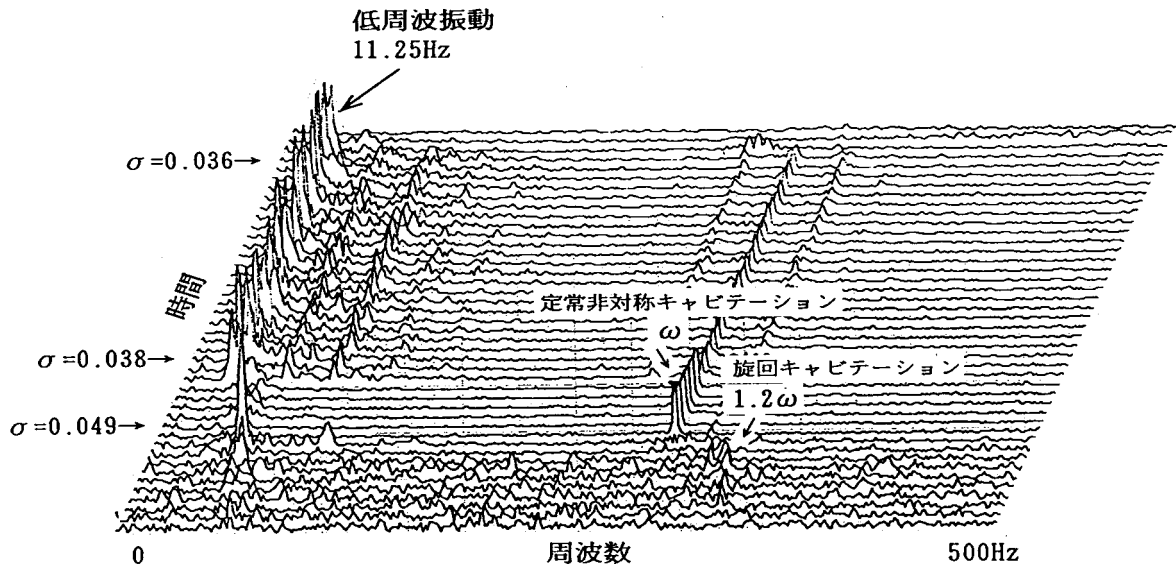


図10 低周波振動の周波数解析 (90%流量、従来型ケーシング)

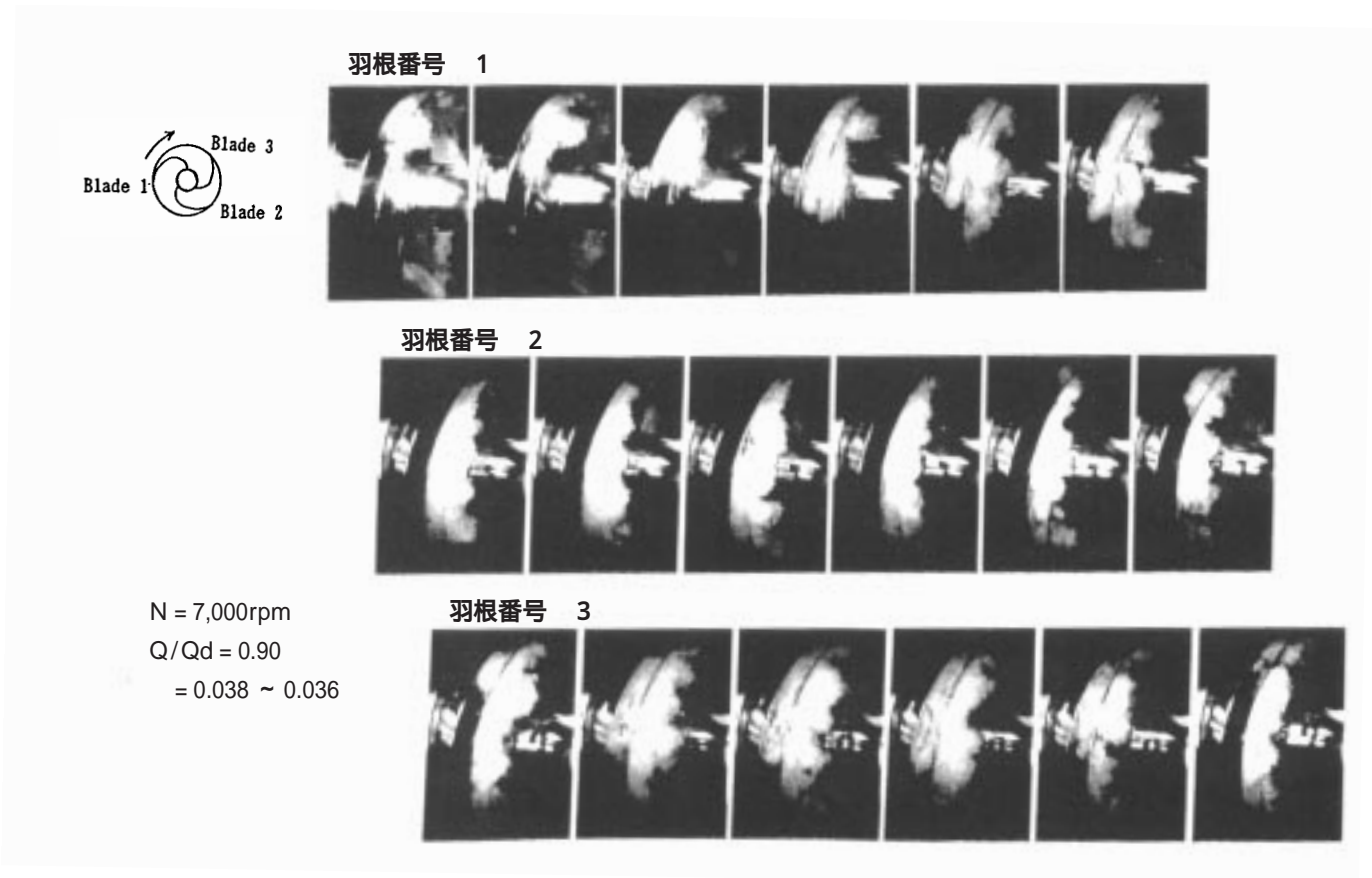


図11 3枚の羽根上のキャビティの変化 (低周波振動)

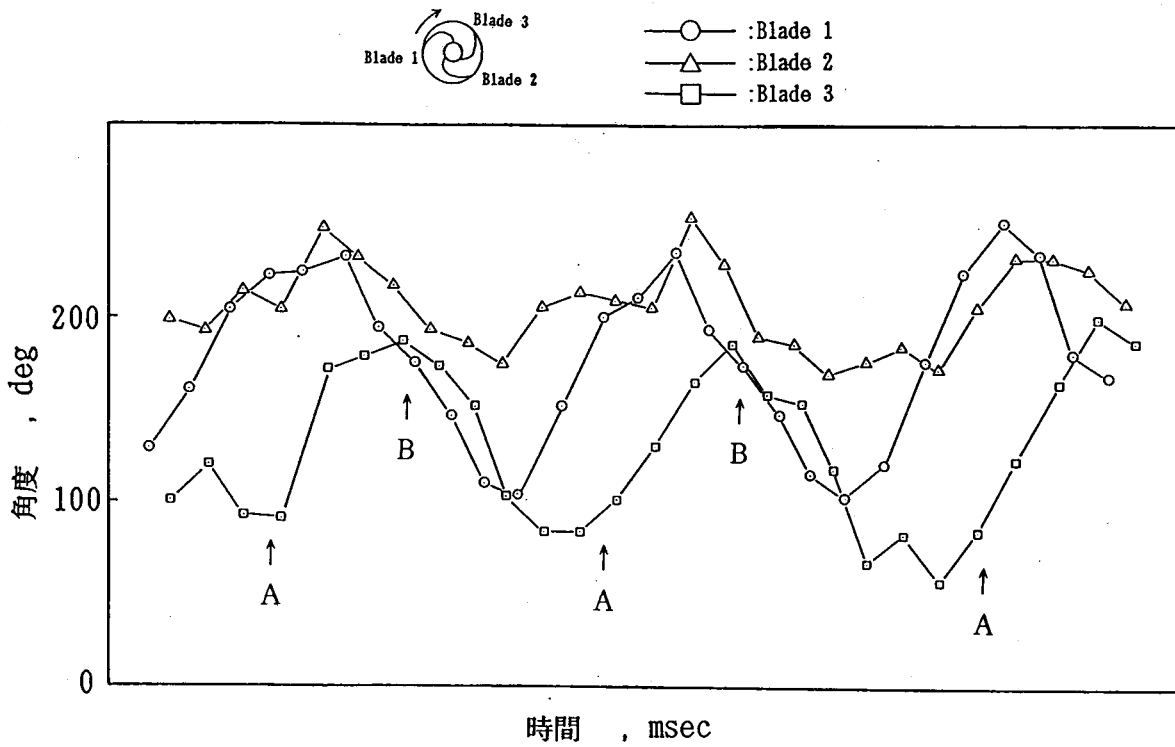


図12 低周波振動のキャビティの変化

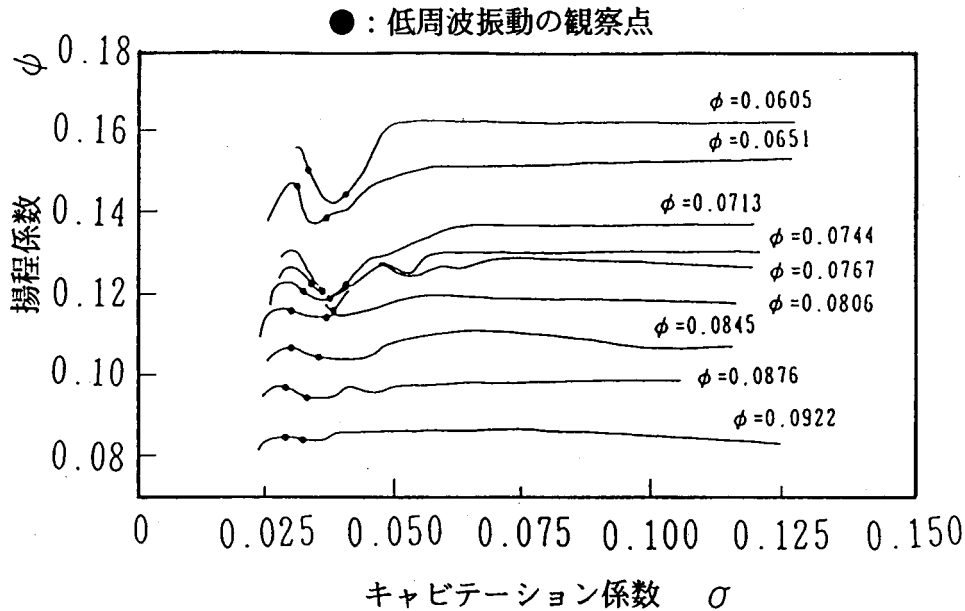


図13 インデューサの吸込性能(従来型ケーシング)

流が旋回キャビテーションの抑制に関与している可能性が考えられた。
 旋回キャビテーションによる振動の抑制効果が認められた改良型ケーシングは、低周波振動の抑制にも効果があるものと思われる。

最後に本研究に関して、大阪大学基礎工学部辻本良信教授から有益な御助言を頂いた。付記して感謝の意を表す。また東北大学・流体科学研究所上條謙二郎教授から御指導を頂いた。深甚なる謝意を表す。航空宇宙技術研究所・角田宇宙技術研究センター志村隆ラムジェット

ト制御研究室長から有益な御助言を頂いた。

5 . 参考文献

- 1) Kamijo, K. et. al.; Hydraulic and Mechanical Performance of LE -7 LOX Pump Inducer, AIAA Journal of Propulsion and Power, vol.9, NO.6, (1993), pp. 819 - 826.
- 2) Tsujimoto, Y. et. al.; A Theoretical Analysis of Rotating Cavitation in Inducers, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.115, NO.1, (1993), pp. 135 - 141.
- 3) 上條謙二郎, 吉田誠; LE - 7 液酸ポンプインデューサの試作研究, 日本機械学会論文集, 57 - 544 B, (1991), pp.33 - 38.
- 4) Robert, S., Ryam et.al.; The Space Shuttle Main Engine Liquid Oxygen Pump High Synchronous Vibration Issue, The Problem, The Resolution Approach, the Solution, AIAA, 94 - 3153, (1994).
- 5) Goirand, B. et. al.; Experimental Investigation of Radial Loads Induced by Partial Cavitation with a Liquid Hydrogen Inducer, IMechE, C453/056, (1992), pp.263 - 269.
- 6) 橋本知之, 渡邊光男, 吉田誠, 谷口浩文, 佐々木宏; LE - 7 液水ターボポンプにおける回転非同期振動の抑制, 日本機械学会流体工学部門講演論文集, 940 - 53, (1994), pp.33 - 34.
- 7) 渡邊光男, 橋本知之, 山田仁, 上條謙二郎; ロケットポンプ用インデューサに発生するキャビテーションの観察, 高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム 1995, 講演論文集, (1995), pp.3 - 8.
- 8) 渡邊光男, 橋本知之, 長谷川敏, 渡辺義明, 山田仁; ロケット用ターボポンプのインデューサに発生する旋回キャビテーションの観察(その1)ケーシング形状による影響, 日本機械学会講演論文集 95, (1995), pp.121 - 122.
- 9) 上條謙二郎, 志村隆, 渡邊光男, 藤田敏彦; ロケット用インデューサの不安定キャビテーションの観察, 航技研報告 TR - 598, (1980).
- 10) Kamijo, K. Shimura, T. and Watanabe, M.; A Visual Observation of Cavitating Inducer Instability, NAL TR-959T, (1980).
- 11) Kamijo, K. Shimura, T. and Watanabe, M.; An Experimental Investigation of Cavitating Inducer Instability, ASME Paper, 77 - WA/FE - 14, (1977).

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1325

ロケットポンプ用インデューサに発生する キャビテーションの観察

(その1 ケーシング形状による影響)

渡邊光男・橋本知之・渡辺義明
長谷川敏・山田仁

1997年5月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

航空宇宙技術研究所報告1325号

平成9年5月発行

発行所 科学技術庁航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話(0422)47-5911 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

© 禁無断複写転載

本書(誌)からの複写、転載を希望される場合は、企画室
調査普及係にご連絡ください。